

光放射圧ポテンシャルによる局所化を用いた金属三次元微細構造創成

—金属ナノ粒子局所化の確率解析—

Fabrication of 3-dimensional microstructure by localizing nano-particles under
radiation pressure potential - analysis of metal particles localization based on
stochastic calculus -

○林晃平, 林政洋, 道畑正岐, 高増潔, 高橋哲 (東大)

○Kohei Hayashi, Masahiro Hayashi, Masaki Michihata, Kiyoshi Takamasu, Satoru Takahashi
(The Univ. of Tokyo)

E-mail: hayashi.k@nanolab.t.u-tokyo.ac.jp

研究背景

本研究の目的は、集光レーザを用いた金属三次元構造創成技術の確立である。金属ナノ粒子を集光レーザのビームウェストに位置変動 10nm 以下で局所化し、局所化した粒子を集積させることで分解能 100nm 以下の精度を持つ三次元加工法を実現させることを目指す。そのためには、金属粒子を光放射圧ポテンシャルの谷に安定して捕捉することが不可欠であり、その際に粒子の熱運動による揺動がボトルネックとなる。本報では、ある光放射圧ポテンシャル下での粒子の運動をランダムなノイズを含む確率微分方程式で記述し、所望量以下の位置変動で金属粒子の局所化を行うための最適粒子径、及び捕捉環境の検討を行う。

確率解析に基づく粒子揺動の数値的評価

ここでは、 $\{B_t\}_{t \geq 0}$ を標準的 Wiener 過程 (Brown 運動) とし、ビーム中心への一次元的な捕捉を考える。粘性係数 γ の媒質中において、ポテンシャル $V(x)$ を持つ保存力により捕捉される質量 m の粒子の運動は、ランダム力 $\xi(t) = \sqrt{2\gamma k_B T} dB_t/dt$ を含む Langevin 方程式

$$m \frac{d^2}{dt^2} x(t) = -\gamma \frac{d}{dt} x(t) - V'(x(t)) + \xi(t) \quad (1)$$

により記述される。ただし、 T は絶対温度、 k_B は Boltzmann 定数である。ここではレーザパワーが強い場合を考え電気双極子までの項を取り、光放射圧ポテンシャルが $V(x) = \frac{1}{2} k x^2$ で与えられると仮定する。捕捉粒子と半径方向強度分布 $I_{int}(r)$ を持つ入射光との相互作用による寄与を含む定数 k は、 c を光速、 ϵ_0 を真空の誘電率、 α_d を金属粒子の分極率とすると、 $k = -\frac{1}{2} \frac{Re(\alpha_d)}{c \epsilon_0} \frac{d^2 I_{int}(r)}{dr^2} \Big|_{r=0}$ により計算される[1]。ナノスケールの粒子を扱う場合には慣性項に比べて粘性項が支配的となるので、慣性項を無視した確率微分方程式を考えると、伊藤の公式により、Langevin 方程式(1)の解 $x(t)$ は、Ornstein-Uhlenbeck(O-U)過程

$$x(t) = x_0 e^{-\frac{k}{\gamma} t} + \sqrt{\frac{2k_B T}{\gamma}} \int_0^t e^{-\frac{k}{\gamma}(t-s)} dB_s \quad (t \geq 0) \quad (2)$$

により一意的に与えられることがわかる[2]。O-U 過程の分散は、時間経過に対し指数的に減衰することがわかる。即ち、 $t \rightarrow \infty$ のとき O-U 過程(2)は分布収束し、極限分布は平均 0、分散 $\sqrt{k_B T/k}$ の正規分布となる。従って上記の枠組みの下では、定常状態における捕捉粒子の揺動を数値的に予測することが可能である (例えば 2σ 規定を適用すれば、常に 95.45% の確率で粒子が半径 $2\sqrt{k_B T/k}$ の円内に捕捉される)。

結論と展望

集光ビームにより金属粒子を捕捉する際に伴う熱運動による揺動を数値的に評価する基準を与え、所定の加工水準を保証するのに必要な粒径及び加工条件について検討した。今後は、上記の加工基準の実験結果との整合性について検討する予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (No.17H04900) 助成および国際科学技術財団の研究助成を受けたものであり、感謝の意を表します。

参考文献

- [1] P. H. Jones, O. M. Maragò, G. Volpe: “Optical Tweezers,” Cambridge (2015).
- [2] I. Karatzas, S. Shreve: “Brownian motion and stochastic calculus,” Springer (1998).